



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**MODERNÍ TRENDY V NOSNÝCH KONSTRUKCÍCH
JEŘÁBŮ**

MODERN TRENDS IN THE SUPPORTING STRUCTURES OF CRANES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Barbora Hájková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Zeizinger

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka: **Barbora Hájková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Zeizinger**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Moderní trendy v nosných konstrukcích jeřábů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá kritickou rešerší z oblasti nosných konstrukcí jeřábů.

Cíle bakalářské práce:

Zpracování kritické rešerše problematiky nosných konstrukcí jeřábů. Rešerše je zaměřena na aplikace různých konstrukcí a zhodnocení efektivity dané konstrukce. Zhodnocení vývojových trendů do budoucna.

Seznam doporučené literatury:

JURÁŠEK, Oldřich. Teorie nosných konstrukcí. Praha: VN MON, 1989.

OSTERRIEDER, Peter a Stefan RICHTER. Kranbahnträger aus Walzprofilen: Nachweise und Bemessungsdiagramme. 2., überarb. Aufl. Braunschweig: Vieweg, 2002. ISBN 9783528125592.

GRIMM, Friedrich. Konstruieren mit Walzprofilen. Berlin: Ernst, 2003. ISBN 9783433028407.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá zpracováním kritické rešerše problematiky nosných konstrukcí jeřábů se zaměřením na věžové jeřáby. Vysvětluje základní pojmy související s konstrukcí jeřábu a jejích dílů. Cílem práce je kritické zhodnocení trendů do budoucna.

KLÍČOVÁ SLOVA

Jeřáby, ocelové konstrukce, pruty, styčníky

ABSTRACT

The thesis presents the critical research on the bearing constructions of cranes with a special focus on the tower cranes. It explains the basic terms related to the crane construction and its parts. The aim of this work is a critical evaluation of the future trends.

KEYWORDS

Cranes, steel constructions, rods, joints

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HÁJKOVÁ, Barbora. *Moderní trendy v nosných konstrukcích jeřábů*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113011>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Lukáš Zeizinger.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Lukáše Zeizingera a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2019

.....

Barbora Hájková

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala Ing. Lukáši Zeizingerovi za vedení této bakalářské práce, cenné rady a připomínky, a hlavně za trpělivost.

OBSAH

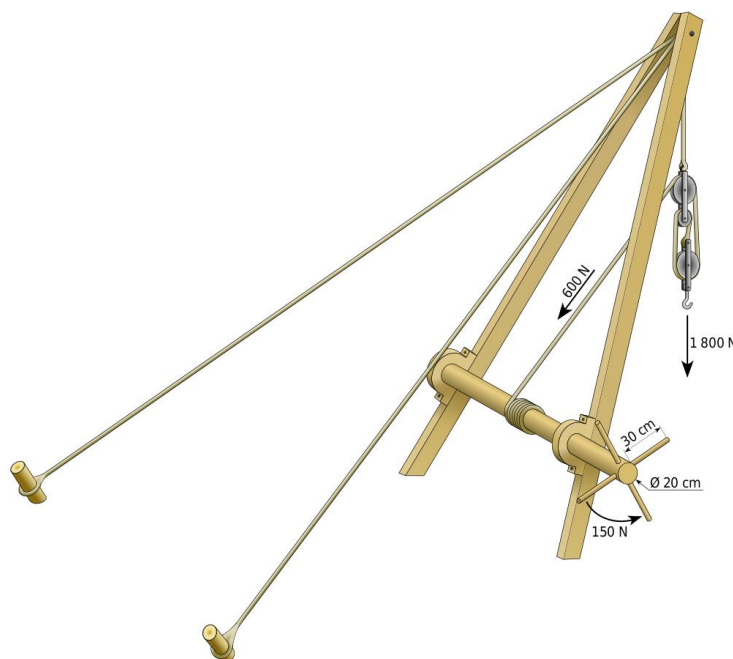
Úvod	9
1 Jeřáby.....	11
2 Ocelové konstrukce	17
2.1 Věžové jeřáby	17
2.2 Pruty.....	18
2.3 Styčníky	23
2.4 Diagonální ztužení	29
2.5 Optimalizace	31
3 Materiály.....	34
3.1 Ocel.....	34
3.2 Dural	35
3.3 Titan	35
3.4 Aditivní technologie	36
3.5 Kompozitní materiály	38
3.6 Porovnání materiálů	39
Závěr.....	41
Použité informační zdroje.....	42
Seznam použitých zkratk a symbolů	47

ÚVOD

Jeřáb je zdvihací zařízení pro vodorovné a svislé přemisťování břemen ve vymezeném prostoru. Pohybu břemen ve svislém směru se dosáhne zdviháním a spouštěním, pohybu ve vodorovném směru se dosáhne pojezdem, otáčením nebo sklápěním. [22]

První jeřáb datujeme kolem 6. - 5. století př. n. l. v Řecku. Ze začátku byl jeřáb zjednodušeně jenom lano položené přes kladku. Předtím, než se zjistilo, že je možné využívat výhody kladky pro zvedání předmětů, byla jednoduchá kladka používána již mezi 8. - 9. stoletím př. n. l. pro čerpání vody ze studní. Jednoduchá kladka neposkytovala žádný mechanický zisk jako takový, ale změnila směr pohybu z tahání k sobě na tahání směrem dolů, kde šlo využívat celou váhu těla. Obecně je udáváno, že síla vyvinutá jednou rukou směrem k sobě se pohybuje kolem 150 N, kdežto směrem dolů kolem 250 N. [16]

Archeologické záznamy ukazují, že nejpozději v roce 515 př. n. l. se na kamenných blocích řeckých chrámů začínají objevovat charakteristické zářezy pro kleště. Protože se tyto otvory nacházejí rovnoměrně nad těžištěm bloku, poukazují tím na použití zdvihacího zařízení. To archeologové považují za pozitivní důkazy potřebné pro existenci jeřábů.



Obrázek 1: Řecko-římský Trispastos („tříbodový jeřáb), nejjednodušší typ jeřábu (zatížení 150 kg) [14]

Po mnoho staletí byly jeřáby poháněny fyzickou námahou mužů nebo zvířat. První „mechanická“ síla byla zajištěna parními motory. Nejstarší parní jeřáby byly zavedeny v 18. nebo 19. století, mnoho z nich zůstalo v užívání až do konce dvacátého století. Moderní jeřáby obvykle používají spalovací motory nebo elektromotory a hydraulické systémy, které poskytují mnohem větší schopnost zvedání než dříve. Nejstarší jeřáby byly vyrobeny ze dřeva, ale postupně se přešlo na ocel. Také přírodní lano bylo nahrazeno ocelovým.

Jeřáby existují ve velké řadě forem, z nichž každý je přizpůsoben konkrétnímu použití. Rozměry se pohybují od malých jeřábů, používaných uvnitř dílny, až po nejvyšší

věžové jeřáby, pro výstavbu výškových budov, a největší plovoucí jeřáby, používané pro stavbu ropných vrstev a záchranu potopených lodí. [6]

Základní pojmy:

- jeřábová kočka – pojízdné zdvihadlo, u něhož se břemeno zvedá pod úrovní jeho dráhy,
- jmenovité zatížení jeřábu – maximální nosnost (včetně všech odnímatelných prostředků k uchopení břemene),
- rozpětí – vodorovná vzdálenost středních rovin pojízdných kol, U podvěsných jeřábů je to vodorovná vzdálenost os vnějších větví jeřábové dráhy,
- rozchod – vodorovná vzdálenost středních rovin jeřábových kolejnic (pouze u vozidlových jeřábů pojíždějících po vlastní dráze),
- rozvor jeřábu – osová vzdálenost pojízdných kol ve směru jeřábové dráhy,
- vyložení jeřábu – vodorovná vzdálenost břemene od svislé osy věže,
- výška zdvihu – svislá vzdálenost mezi nejnižší a nevyšší pracovní polohou háku. Do pracovní polohy se nepočítají krajní polohy omezené koncovými vypínači,
- momenty nosnosti jeřábů – klopný moment M [kNm] vzniká na výložníku, který je zatížen břemenem Q [kN] ve vzdálenosti L [m] vyložení od svislé osy jeřábové věže,
- rychlost pohybů jeřábu – rychlost pojezdu jeřábu po jeřábové dráze, rychlost otáčení jeřábové věže, rychlost zdvihu břemene, rychlost pojezdu kladky po výložníku. [10]

1 JEŘÁBY

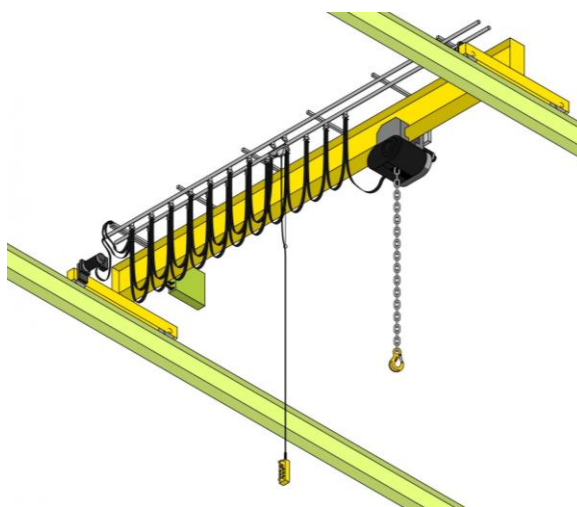
Jeřáby se podle různých autorů dělí do mnoha skupin, které se často vzájemně prolínají.

Jeřáby můžeme dělit na:

- jeřáby mostového typu – mostové, portálové, poloportálové
- jeřáby výložníkového typu – věžové, sloupové, derikové
- jeřáby lanového typu – lanové

JEŘÁBY MOSTOVÉHO TYPU

Jeřáby mostového typu se skládají z několika částí. Nosnou ocelovou konstrukci tvoří charakteristický jeřábový most, který pojíždí po vyvýšené dráze. Dále je tvořen dvěma hlavními nosníky a příčnými nosníky. Na hlavních nosnících jsou umístěny kolejnice, po kterých se pohybuje jeřábová kočka. Často jsou používány jako jeřáby dílenské, montážní, hutné, stohovací apod. [22] Jejich pracovní pole má tvar obdélníku.

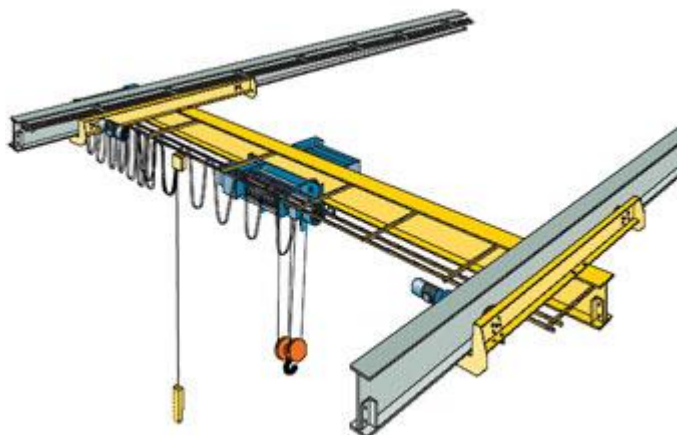


Obrázek 2: Mostový jeřáb běžný [8]

Mostové jeřáby

Mostové jeřáby lze podle tvaru rozdělit na běžné, podvěsné a speciální. *Běžné jeřáby* (obrázek 2) pojíždějí po horních plochách kolejníc jeřábové dráhy a dělí se na jednonosníkové a dvounosníkové. U jednonosníkových může být nosník z válcovaného nebo skříňového profilu. Nosnost je až 10 t, rozpětí až 25 m. U dvou nosníkových je jeřáb tvořen dvěma hlavními nosníky, které jsou nosným prvkem pro ostatní zařízení jeřábu. Nosnost je běžně do 80 t, rozpětí obvykle do 32 m. *Podvěsné jeřáby* (obrázek 3) jsou jednonosníkové, zavěšené na visuté jeřábové dráze, po jejichž spodních přírubách tvaru U nebo I pojíždí jeřábová kočka. Jeřábová dráha bývá nesena střešní konstrukcí, pod kterou jeřáb pojíždí. Jejich nosnost je

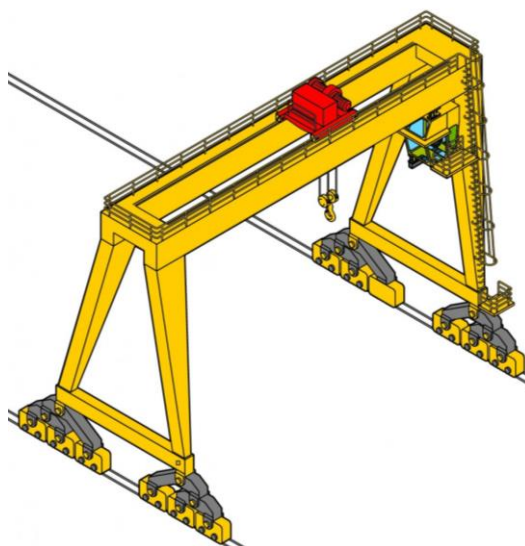
obvykle do 10 t. *Speciální jeřáby* mají speciální konstrukce. Lze mezi ně například řadit stohovací jeřáby. [22]



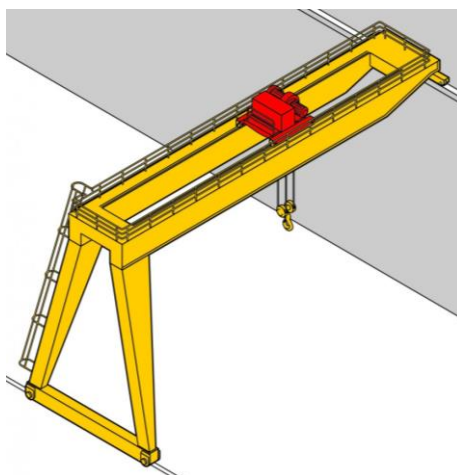
Obrázek 3: Mostový jeřáb podvěsný [55]

Portálové a poloportálové jeřáby

U portálových jeřábů tvoří nosnou konstrukci jeřábu tzv. portál, který je tvořen z jeřábového mostu a dvou podpěr. Portál je buď pevně zakotven k základu (nepojízdné jeřáby) nebo pojíždí po jeřábové dráze uložené na zemi (obrázek 4). Poloportálový jeřáb (obrázek 5) má jednu větev jeřábové dráhy ve výši jeřábového mostu, zpravidla na budově, opěrné zdi apod. Portálové a poloportálové jeřáby pracují nejčastěji pod širým nebem. Jejich práce se často omezuje na pohyby kočky nebo otočného výložníku.[10]



Obrázek 4: Pojízdný portálový jeřáb [8]



Obrázek 5: Pojízdný, poloportálový, běžný, dvounosníkový jeřáb [8]

Jak je možné vidět na obrázek 6, i jeřáby mostového typu mohou mít příhradovou konstrukci. Většinou se používá u jeřábů pracujících pod širým nebem.



Obrázek 6: Portálový jeřáb příhradové konstrukce [20]

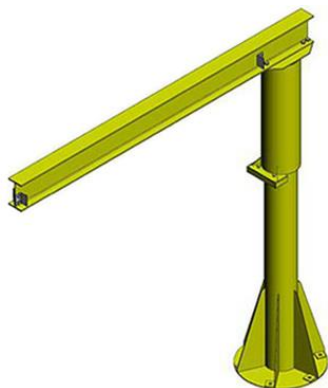
JEŘÁBY VÝLOŽNÍKOVÉHO TYPU

Používají se především ve stavebnictví a jako jeřáby montážní. Stručně se dá říct, že hlavní část konstrukce se otáčí kolem svislé osy a sklopné momenty jsou zachycovány sloupem nebo věží. [22]

Hlavní části tvoří jeřabový podvozek, jeřabová věž a výložník. Dále pak kabina, motor, prostředky pro uchopení břemena, protivýložník, protizávaží atd.

Jeřabové podvozky se dělí na podvozky *kolejové* – pojíždějí po kolejové dráze (obrázek 8), *rámové* – jsou pevně uchyceny k vlastní základové konstrukci, *automobilní* – pohybují se na speciálních podvozcích a *pásové*.

Na podvozek navazuje jeřábová věž. Ta může být sloupová (obrázek 7), příhradová nebo šplhavá. *Sloupová věž* se používá u malých jeřábů, může být tvořena čtyřhranným dutým ocelovým profilem, s jedním nebo dvěma teleskopicky zasouvateľnými díly. *Příhradová věž* (obrázek 8) je v dnešní době nejčastějším typem věže. Je tvořena vzájemně svázanými pruty. Příhradová konstrukce je obecně dražší než plnostěnná, a to jak z pohledu výroby, tak při následné údržbě. Je ale lehčí a unese větší zatížení. Třetím typem věže je *šplhavá věž*. Délka věže je neměnná, věž se zvedá do vyšších pater mechanicky nebo hydraulicky. Tím se dosáhne možnosti zvedání do potřebné výšky s rostoucí výškou stavby.



Obrázek 7 věž z plného profilu – sloup [7]

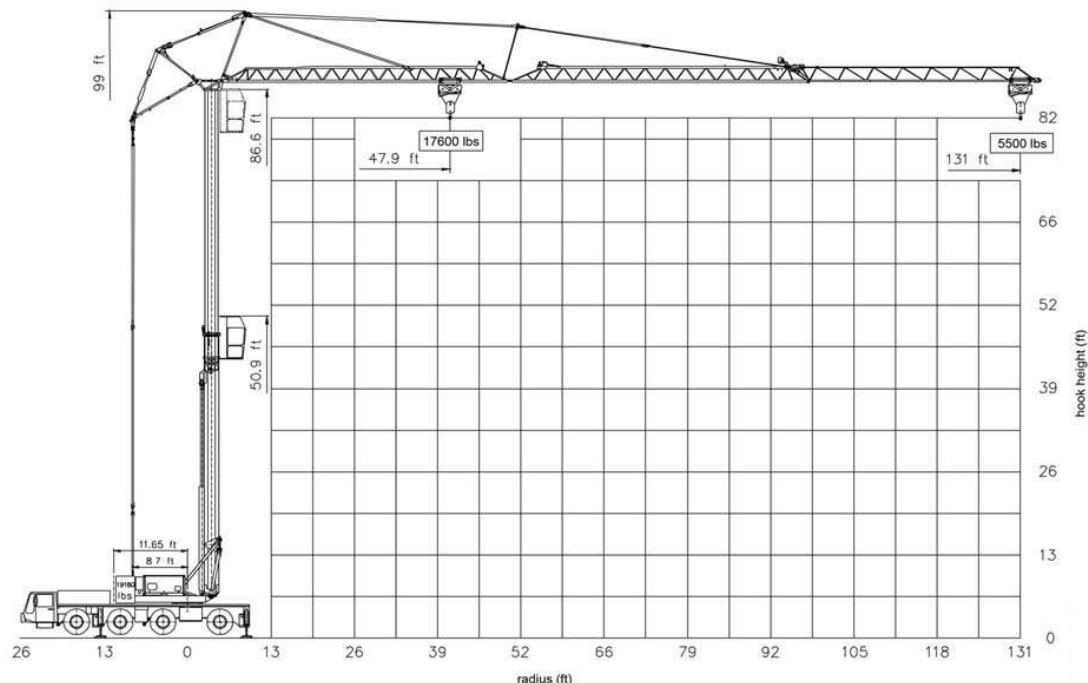
Z věže vychází *výložník*. Ten může být *vodorovný s pojízdnou kladkou* (obrázek 8), na které je zavěšeno lano s jeřábovým hákem, *vodorovný teleskopický*, s možností vysunutí jednoho dílu, *sklopný*, kde jeřábový hák s kladnicí je pevně zakotven na konci výložníku nebo *lomený*. Lomený je kombinací výhod výložníku vodorovného a sklopného, spodní díl je sklopný a horní díl vodorovný.

Jeřáby výložníkového typu dále dělíme na jeřáby s horní otočí a s dolní otočí. U jeřábů s dolní otočí se otáčí celá konstrukce i se sloupem. U jeřábů s horní otočí se otáčí pouze výložník, jak je opět vidět na (obrázek 8).



Obrázek 8: Věžový jeřáb příhradové konstrukce, s horní otočí, kolejovým podvozkem a vodorovným výložníkem. [62]

U tohoto typu jeřábů je závislost mezi délkou vyložení a nosností. Na konci výložníku je nosnost nejnižší a směrem k věži se zvyšuje. V určité vzdálenosti od věže získá konstantní hodnotu (obrázek 9).



Obrázek 9: Schéma nosnosti jeřábu vzhledem k délce vyložení [45]

Derikové (stožárové) jeřáby

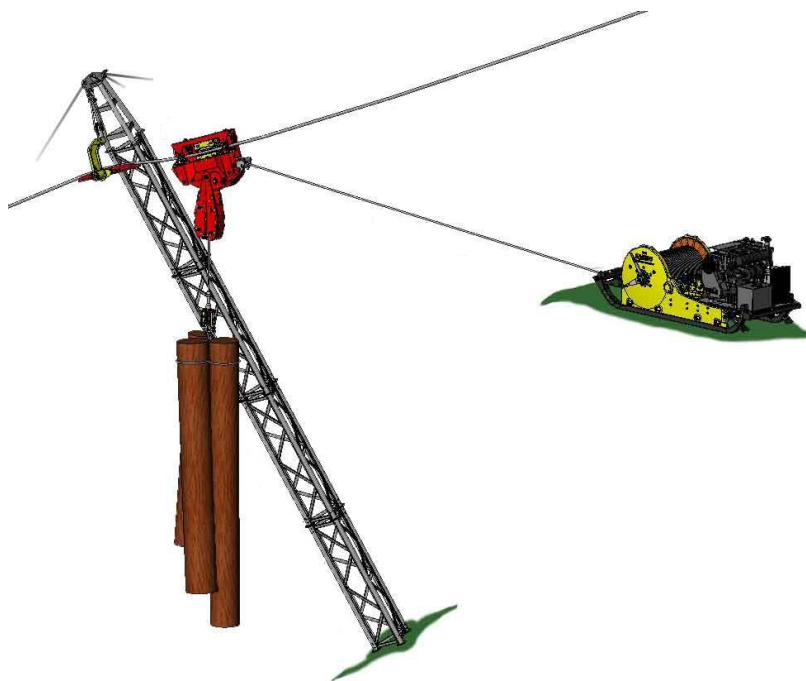
Jsou odvozeny od palubních zdvihacích zařízení na lodích. [10] Vyznačují se výložníkem kloubově uloženým ve spodní části a stojatým stožárem, který je podepřen nahoře a dole. Tento typ otočného jeřábu může mít stožár nahoře zachycen kotevními lany nebo tuhým vyztužením. [38]



Obrázek 10: Derikový jeřáb [9]

JEŘÁBY LANOVÉHO TYPU

Lanový jeřáb (obrázek 11) se používá na přemísťování materiálu v těžko přístupných oblastech. Skládá se z nosného lana, vodícího lana, podpěrných věží, jeřábových jednotek, navijáků a kotvicích věží.



Obrázek 11: Lanový jeřáb [43]

2 OCELOVÉ KONSTRUKCE

První stavební ocelové konstrukce se objevili až ve středověku, antická architektura je neznala. Používání železných konstrukcí jako nosných koster se začalo rozšiřovat v 17. století. Celokovové stavební konstrukce se objevily v Anglii v první polovině 18. století.

Dříve se ke stavbě používaly pouze válcované materiály, ale nová technologie výroby dovoluje používat i profily lisované za studena, čímž se snižuje váha konstrukce. [4] U ocelových konstrukcí jsou podle ČSN EN 1990 požadována opatření k omezení koroze, opotřebení a možné únavy materiálu. [58] Jejich životnost se obecně uvažuje 80 až 100 let. [46]

K nejrozšířenějším ocelovým konstrukčním tvarům patří rovinné příhradové. Používá se jich při velkém rozpětí, kde by plnostenná konstrukce byla těžká a nevhodná. Výrobně jsou příhradové nosníky dražší než plnostenné, a i jejich údržba je nákladnější. [4]

Nosná konstrukce jeřábů zachytává tíhu břemene, statické a dynamické síly hnacích ústrojí, účinky větru a dynamické síly při provozu. Konstrukce musí být dostatečně pevná, tuhá, s malými setrvačnými účinky, bezpečná a zároveň lehká. Tvoří ji nosníky, sloupy, výložníky atd. [22]

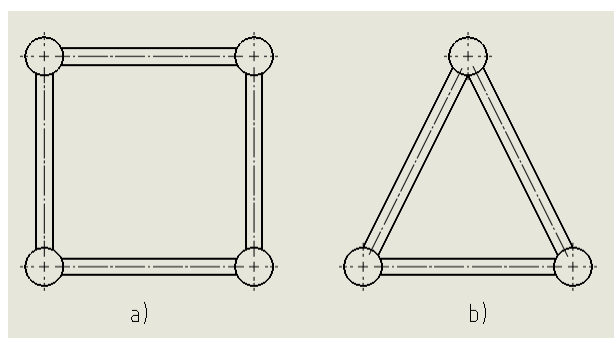
Ocelová konstrukce musí být navržena, propočítána a konstrukčně provedena tak, aby mohla plnit tyto požadavky:

- bezpečně zajišťovat provoz jeřábu,
- vykazovat náležitou pevnost, tuhost, trvanlivost a stabilitu,
- využívat v maximálně možné míře vlastnosti materiálu při nejmenších nákladech,
- zajišťovat ekonomickou výrobu, snadnou montáž a demontáž,
- zajistit estetický vzhled konstrukce. [10]

Jednotlivé prvky konstrukce se vždy navrhují na nejnepríznivější kombinaci zatížení.

2.1 VĚŽOVÉ JEŘÁBY

Ocelové konstrukce věžových jeřábů mívají nosnou část jako příhradovou konstrukci tvaru stožáru. Nejčastěji má čtvercový průřez (obrázek 12a), řidčeji pak trojúhelníkový (obrázek 12b). [10] Pro menší nosnosti může být stožárová věž z plného profilu - sloup. [31] Výložníkové rameno je zakotveno uprostřed hlavního stožáru nebo u jeho paty.



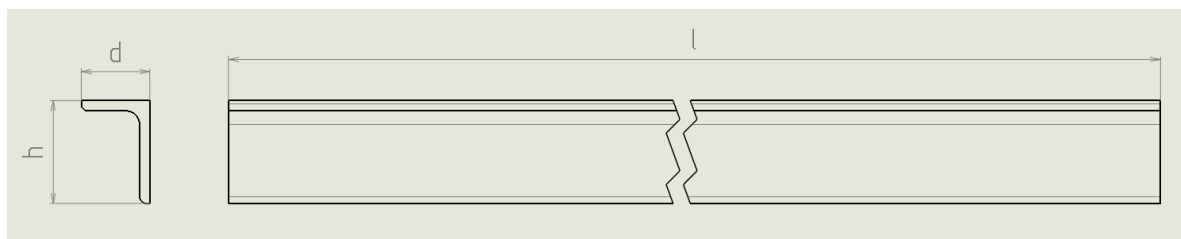
Obrázek 12: Příčný průřez věží a)čtvercovou b)trojúhelníkovou

Používání ocelových konstrukcí u věžových jeřábů má mnoho výhod. Patří mezi ně využívání materiálů vysokých pevností, díky čemuž je konstrukce lehčí a pevnější. To pozitivně ovlivňuje i přepravu jednotlivých dílů. Konstrukce jsou adaptabilní podle provozních podmínek a poměrně snadno je lze rekonstruovat. Práce na staveništi se pak omezuje na rychlou montáž/demontáž. [36]

Kromě již zmíněných požadavků musejí ocelové konstrukce splňovat podmínky normy ČSN EN 1090-1+A1 (732601) - Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 1: Požadavky na posouzení shody konstrukčních dílců.

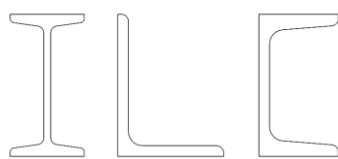
2.2 PRUTY

Prut je prvek, u něhož jeden délkový rozměr l (délka) značně převládá nad rozměry příčnými d (šířka), h (výška). Střednice může být obecně přímá, lomená či zakřivená čára. [19]



Obrázek 13: Válcovaný prut

V teorii je prut idealizací skutečného tvaru prvku, při zanedbání nepřesností v geometrii, nestejnorodosti materiálu a jeho vlastností. Pruty jsou nejjednoduššími konstrukčními prvky, z nichž lze kombinací vytvořit složitější prutové soustavy - prutové konstrukce. [37] V realitě jsou jako pruty používány válcované profily tvarů I, L a U (obrázek 14) nebo profily uzavřené kruhového nebo čtvercového (obdélníkového) průřezu (obrázek 15).



Obrázek 14: Válcované profily



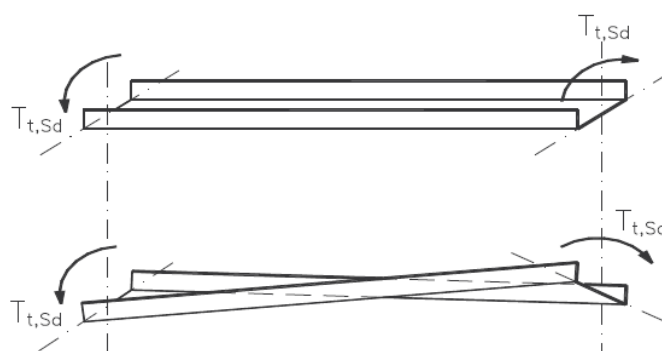
Obrázek 15: Uzavřené profily

Vázané kroucení – základní pojmy

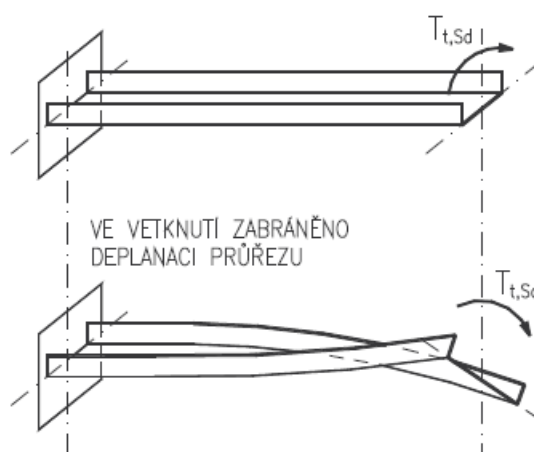
Volné (prosté) kroucení – v prutu vznikají pouze smyková (tangenciální) napětí. Jejich rozložení v průřezu závisí pouze na jeho tvaru a je ve všech průřezích stejné.

Vázané kroucení – kromě smykových napětí vznikají i napětí normálová. V průřezu jsou rozložena nerovnoměrně, a proto se prut i ohýbá. [33]

Při kroucení tenkostěnného prutu obecně vznikají oba druhy kroucení, tento jev je označován jako *složené kroucení*.



Obrázek 16: Volné kroucení



Obrázek 17: Složené (vázané) kroucení

Deplanace - nastává porušení původní rovinnosti příčných řezů nerovnoměrným posuvem bodů průřezu ve směru podélné osy prutu. [29]

Deplanaci mohou omezovat:

- konstrukční uspořádání, např. způsob podepření, zejména vetknuté konce prutu,
- změna kroutícího momentu podél osy prutu, zejména jeho případná nespojitost,
- změna tvaru a rozměrů podél osy prutu.

U prutů, jejich průřez při kroucení nedeplanuje, vzniká vždy jen prosté kroucení.

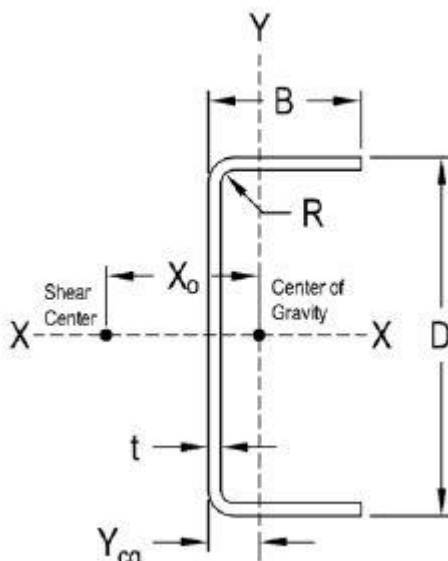
Bimoment – jde o silovou dvojici druhého řádu. Lze jej považovat za pomocnou funkci, k jejímuž určení je nutno znát funkci úhlu zkroucení nebo funkci relativního úhlu zkroucení. Tuto veličinou zavedl Vlasov.

$B = \int \sigma_{\omega} \omega dF$ pro uzavřené profily nebo $B = \oint \sigma_{\omega} \omega dF$ pro uzavřené profily,

kde ω je výsečová plocha a σ_{ω} normální napětí od vázaného kroucení.

O sekundárních smykových napětích lze předpokládat, že mají směr tečny ke střednici průřezu a že jsou podél jeho tloušťky stálá. Tato napětí se podél tloušťky stěny sečtou a vytvoří *smykový tok*. Ten je závislý na normálním napětí doprovázející ohyb.

Střed smyku – bod, do něhož je nutno umístit příčné vnější síly, nemá-li být ohýbaný prut současně kroucen. [34]

Obrázek 18: Střed smyku (x)

Hodnoty normálních napětí od vázaného kroucení jsou u uzavřených průřezů zanedbatelné. [21] Také se neřeší uložení konců nosníků.

Problematiku vázaného kroucení vyřešil Vlasov. Aplikace obecné Vlasovovy teorie tenkostěnných prutů je však velmi pracná, a proto byly vypracovány jednoduché, i když méně přesné metody výpočtu kroucení prutů. Jde například o zjednodušenou analogii ohybu a kroucení. Použití této analogie předpokládá, že tuhost průřezu prostého kroucení je zanedbatelně malá a platí tedy že $GI_t \rightarrow 0$. Tím se rovnice volného kroucení zjednoduší na tvar platný pouze pro vázané kroucení, tedy:

$$EI_{\omega} \varphi^{IV} = m, \quad (1)$$

kde I_{ω} je výšečový moment setrvačnosti průřezu ke středu smyku a φ je úhel pootočení průřezu.

Řešení zachovávající výhody zjednodušené analogie a respektující přitom skutečnou tuhost průřezu v prostém kroucení vychází z principu modifikované analogie. Vychází se z výrazu pro bimoment, který se určuje ze vztahu $B_o = Me$ pro $GI_t \rightarrow 0$, tj. s využitím známých vztahů pro ohybový moment. Hodnota B_o se opraví s ohledem na skutečnou tuhost v prostém kroucení podle vztahu:

$$B = B_o(1 - \chi), \quad (2)$$

kde pro opravný součinitel χ platí obecný vztah:

$$\chi = \frac{B(GI_t \rightarrow 0) - B(GI_t)}{B(GI_t \rightarrow 0)}. \quad (3)$$

Na základě vztahu $B = B_o(1 - \chi)$ je možné s využitím rovnice $T_o + T_t = T$ a $T_o = B'$ psát výsledné vztahy pro výpočet silových veličin složeného kroucení:

$$B = Me(1 - \chi), \quad (4)$$

$$T_t = Te\chi, \quad (5)$$

$$T_o = Te(1 - \chi). \quad (6)$$

Pruty s uzavřeným průřezem mají v porovnání s pruty s otevřeným průřezem velkou tuhost v kroucení. Protože je jejich deplanace zpravidla zanedbatelná, lze ji přibližně brát $\sigma_o = \tau_o = 0$. Smykové napětí od prostého kroucení se určí podle vztahu:

$$\tau_t = \frac{T_{Sd}}{\Omega t} \quad (7)$$

T_{Sd} ... vnější kroutící moment v posuzovaném průřezu,

Ω ... dvojnásobná plocha omezená střednicí průřezu,

t ... tloušťka průřezu v posuzovaném místě.

Při kroucení se složky vnitřních sil B_{Sd} , $T_{o,Sd}$, $T_{t,Sd}$ mohou určit přesně nebo přibližně.

Přesné řešení spočívá ve vyřešení diferenciální rovnice složeného kroucení s uvážením konkrétních okrajových podmínek uložení konců prutů v kroucení.

$$EI_o\varphi^{IV} - GI_t\varphi'' = m, \quad (8)$$

kde m je kroutící zatížení prutu a φ je úhel pootočení průřezu, jenž je předmětem řešení této rovnice.

$$B_{Sd} = -EI_o\varphi'' \quad (9)$$

$$T_{o,Sd} = -EI_o\varphi''' \quad (10)$$

$$T_{t,Sd} = I_t\varphi' \quad (11)$$

Přibližné řešení je analogií ohybu s kroucením s respektováním tuhosti v kroucení. Tedy působí-li příčné zatížení na prut otevřeného průřezu v rovině, jejíž vzdálenost od středu smyku C_s má hodnotu e .

$$B_{Sd} = M_{Sd}e(1 - \kappa), \quad (12)$$

$$T_{o,Sd} = V_{Sd}e(1 - \kappa), \quad (13)$$

$$T_{t,Sd} = V_{Sd}e\kappa, \quad (14)$$

kde M_{Sd} je návrhový ohybový moment, V_{Sd} posouvající síla v posuzovaném průřezu. Obě tyto veličiny jsou určené pro podmínky podepření krutu v kroucení. κ je součinitel vlivu tuhosti prutu v prostém a ohybovém kroucení, který lze brát přibližně:

$$\kappa = \frac{1}{\beta + \left(\frac{\alpha}{\psi L} \right)^2}, \quad (15)$$

kde L je délka prutu a α, β jsou součinitelé podmínek uložení a zatížení, ψ je parametr kruhu, který se vypočítá [29]:

$$\psi = \sqrt{\frac{GI_t}{EI_\omega}} = 0,62 \sqrt{\frac{I_t}{I_\omega}}. \quad (16)$$

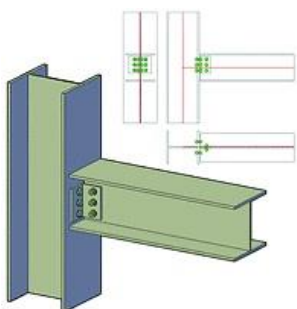
2.3 STYČNÍKY

Styčník je prvek, spojující jeden nebo více prvků mezi sebou. Zvláštním typem konstrukčního styčnicku je kotvení konstrukce, připojující soustavu prutových prvků k zemi. [61]

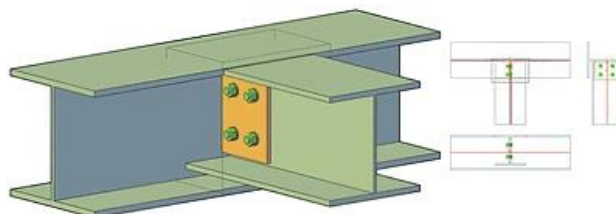
Spojení prutů může být provedeno několika způsoby. Nejčastěji se používají spoje šroubové, nýtové, čepové nebo svarové. Nýtové a svarové spoje jsou nerozebíratelné a používají se pro spojení menších celků. Ty jsou pak spojovány šrouby nebo čepy, protože ty lze uvolnit bez porušení spojovaných nebo spojovacích prvků. Svarové spoje jsou ve srovnání se spoji šroubovými a nýtovanými obvykle jednodušší (nevyžadují pomocné úhelníky) a lehčí. Konstrukční styčnický lze složit z jednotlivých přípojí, jako jsou úhelníky (obrázek 19), plechy (obrázek 21), styčnickové desky (obrázek 20), příložky, čelní desky aj. například styčnickové plechy jsou prostředníkem mezi silami, nacházejícími se ve spoji. Tloušťka plechů je dána velikostí sil v připojovaných prutech. Rozměry a tvar určuje počet a profil prutů, způsob spojování a vzhled konstrukce. Měly by být co nejméně namáhané na ohyb. [64],[4],[25] Vše se řídí normou ČSN EN 1993-1-8 Navrhování styčníků.

Základní typy styčníků:

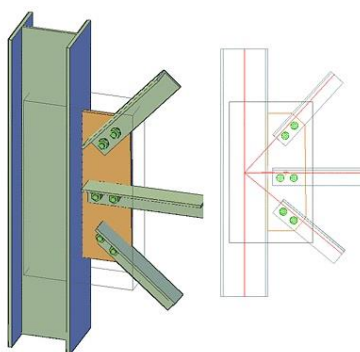
- připojení nosníku na sloup,
- spojení dvou nosníků,
- kotvení sloupu,
- připojení diagonály ztužidla na nosník a sloup,
- přípoje příhradového nosníku.



Obrázek 19: Kloubový spoj úhelníky [23]



Obrázek 20: Přípoj deskou na stojně nosníku [40]



Obrázek 21: Styčnický plech tří diagonál [47]

U šroubovaných a nýťovaných spojů je nutno dodržet některé konstrukční zásady. Jde zejména o dodržování maximálních a minimálních vzdáleností mezi spojovacími prostředky ve směru působících sil, kolmo ke směru působících sil nebo vzdálenost od krajů spojovaných částí. [64]

Šrouby se počítají na namáhání stříhem, otlačením a tahem.

$$\text{- stříhem} \quad F_{v,Rn} = \frac{\alpha_v R_m A_s}{\gamma_{M2}} \quad (17)$$

$$\text{- otlačením} \quad F_{v,Rn} = \frac{k_1 \alpha_b R_{mP} d t}{\gamma_{M2}} \quad (18)$$

$$\text{- tahem} \quad F_{t,Rn} = \frac{0,9 R_m A_s}{\gamma_{M2}} \quad (19)$$

Pokud rovina stříhu prochází částí šroubu se závitem, pak pro pevnostní třídy 4.6, 5.6 a 8.8 je $\alpha_v = 0,6$, pro pevnostní třídy 4.8, 5.8, 6.8 a 10.9 je $\alpha_v = 0,5$.

Jestliže rovina stříhu prochází částí šroubu bez závitu, pak je $\alpha_v = 0,6$ a místo A_s se v rovnici (17) dosadí průřez hladké válcové části dráku šroubu $S_d = \pi d^2 / 4$.

$$\text{- otlačením} \quad F_{v,Rn} = \frac{k_1 \alpha_b R_{mP} d t}{\gamma_{M2}} \quad (20)$$

- tahem

$$F_{t,Rn} = \frac{0,9R_m A_s}{\gamma_{M2}} \quad (21)$$

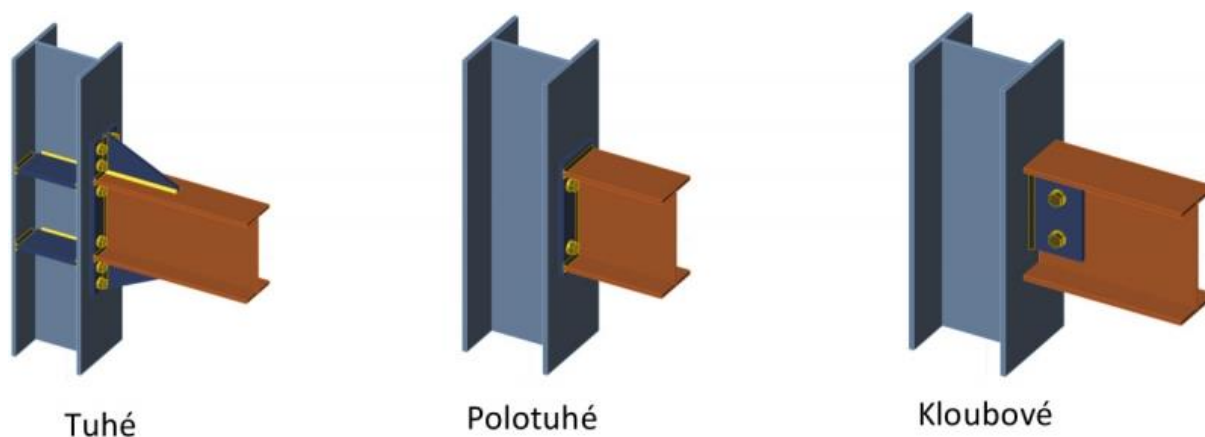
R_m je pevnost v tahu spojovací součásti, A_s výpočtový průměr šroubu, γ_{M2} je součinitel spolehlivosti materiálu pro styčníky ($\gamma_{M2} = 1,25$), R_{mP} pevnost v tahu spojované součásti a součin dt je průmět otláčované plochy. [44]

Styčníky lze z hlediska globální analýzy třídit podle tuhosti, únosnosti a tažnosti.

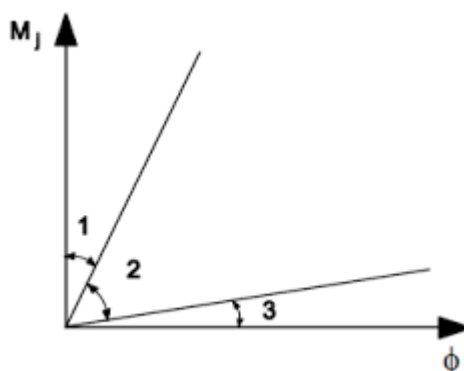
Podle *ohybové tuhosti* se styčníky dělí na tuhé, kloubové a polotuhé. Konstrukce s *tuhými* styčníky lze uvažovat jako spojitě. U tuhých styčníků lze předpokládat, že mají dostatečnou rotační tuhost, která při analýze umožňuje využít plné spojitosti.

Kloubový styčník má být schopen přenášet vnitřní síly, aniž by se vytvářely významné momenty, které by mohly nepříznivě ovlivňovat pruty nebo konstrukci jako celek. Také má umožnit natočení od návrhového zatížení.

Styčník, který nesplňuje podmínky pro tuhé styčníky ani pro kloubové styčníky, se má klasifikovat jako *polotuhý*. Poskytuje předvídatelnou míru spolupůsobení mezi pruty, která je založena na jeho návrhovém pracovním programu a má být schopen přenášet vnitřní síly a momenty.



Obrázek 22: Příklady tuhého, polotuhého a kloubového styčníku (x)



Obrázek 23: Grafická klasifikace styčnicků [12]

V oblasti 1 jsou tuhé styčníky, jestliže $S_{j,ini} \geq k_b E l_b / L_b$ kde $k_b = 8$ pro pruty konstantní, kde ztužení omezuje vodorovné deformace na nejméně 80 %. Nebo $k_b = 25$ pro ostatní prutové konstrukce, za předpokladu, že v každém patře $K_b / K_c \geq 0,1$. Pro $K_b / K_c < 0,1$ se styčníky klasifikují jako polotuhé.

Všechny styčníky v oblasti 2 se mají klasifikovat jako polotuhé. Styčníky v oblastech 1 a 3 se mohou také uvažovat jako polotuhé.

Do oblasti 3 spadají kloubové styčníky, jestliže $S_{j,ini} \leq 0,5 E l_b / L_b$.

K_b je střední hodnota I_b / L_b pro všechny nosníky nad uvažovaným podlažím,

K_c je střední hodnota I_c / L_c pro všechny sloupy v uvažovaném podlaží,

I_b moment setrvačnosti nosníku,

I_c moment setrvačnosti sloupu,

L_b rozpětí nosníku (mezi středy sloupů),

L_c výška podlaží (sloupu). [12]

Podle *únosnosti* se rozlišují styčníky částečně ohybově únosné a plně únosné v porovnání s únosností nosníku. Z hlediska návrhu se rozlišují přípoje navržené na plnou únosnost připojovaných prvků a spoje navržené na skutečně působící síly.

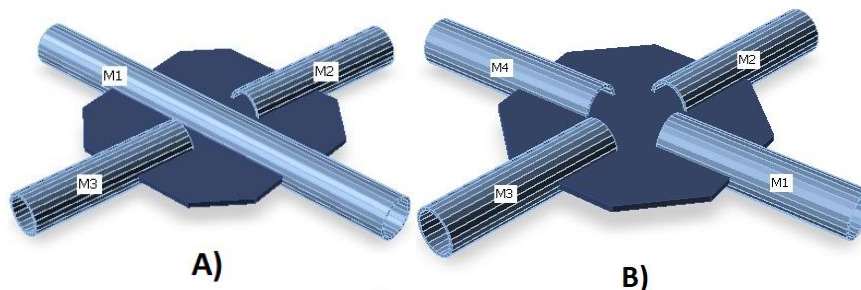
Podle *tažnosti* se styčníky klasifikují na dostatečně tažné pro plastickou analýzu konstrukce (třídy 1), na dostatečně tažné pro plastické posouzení přípoje při pružném posouzení konstrukce (třídy 2) a s omezenou tažností pro pružné posouzení přípoje (třídy 3).

V moderních konstrukcích se zvyšuje spolehlivost konstrukce použitím tažných přípojí, tj. přípojí třídy 1 a 2. Současné svařované přípoje dosahují dostatečné tažnosti. U šroubovaných přípojí je vždy třeba zabývat se tažností.

Tuhost, únosnost a tažnost styčníků má vliv na chování rámu jako celku. Využitím tuhosti a částečné spojitosti (plastický kloub ve styčniku) přinášejí poddajné styčníky větší volnost ve volbě požadovaných vlastností rámu. [61]

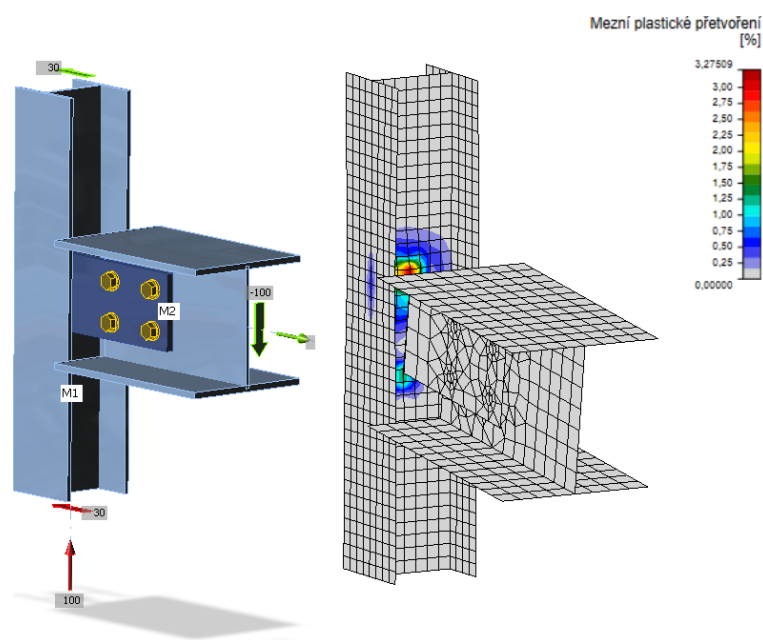
Příklad nevhodného provedení styčniku a jeho úprava:

Na (obrázek 24A) je znázorněno křížení dvou diagonál. Jeden prut byl ponechán jako průběžný a styčnickové plechy k němu byly z obou stran přivařeny. Kruhový průřez je ale málo odolný na příčné namáhání a může dojít ke změně tvaru průřezu trubky v elipsu. Na (obrázek 24B) je návrh vhodnějšího řešení, kdy se všechny diagonály propojí jedním styčnickovým plechem. Výsledkem je celková větší tuhost styčniku. [49]



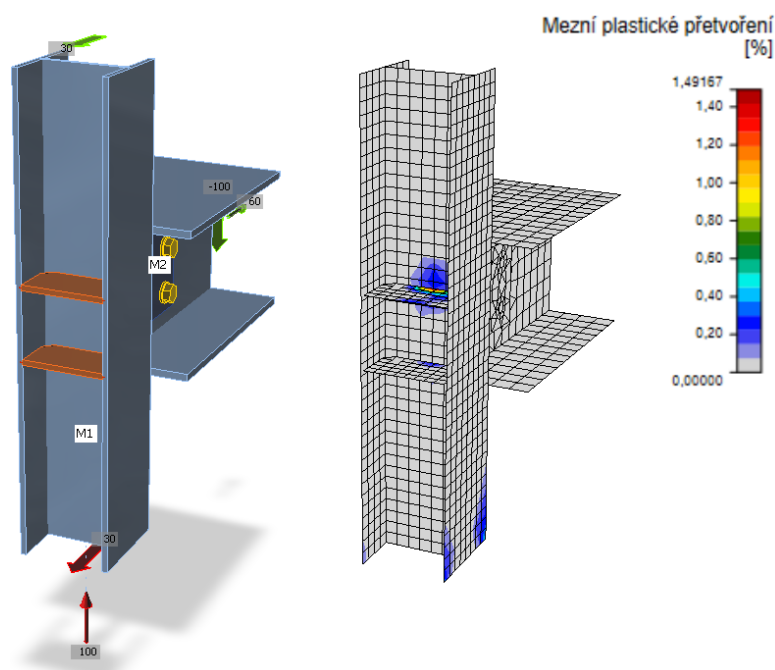
Obrázek 24: Křížení diagonál A)původní (nevhodné) řešení, B)návrh vhodnějšího řešení [49]

Dalším příkladem je šroubové připojení nosníku na měkkou osu sloupu. Připojení nosníku na sloup bylo navrženo pomocí přípojného plechu přivařeného ke stojině sloupu. Bylo uvažováno se zatížením smykovou a normálovou silou. Ve skutečnosti však plech funguje jako krátká konzola, která je namáhána i ohybovým momentem. Pokud se toto zatížení přenese na tenkou stojinu sloupu, způsobí její nadměrné namáhání. V daném případě se stojina sloupu přiblížila povolené hranici plastické deformace již při 25 % předpokládaného zatížení (obrázek 25).



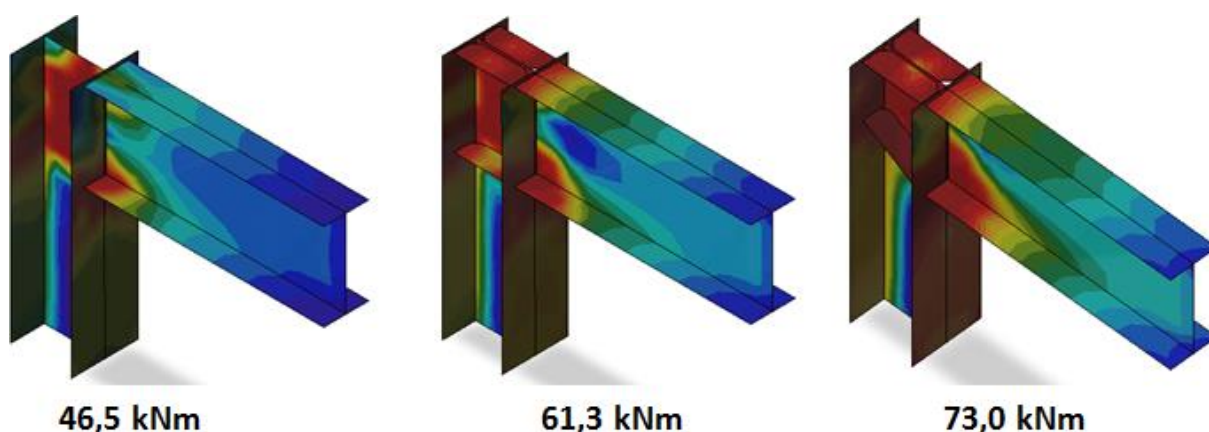
Obrázek 25: Původní návrh přípoje, přehled posudků, průběh plastické deformace [41]

Při znalosti způsobu porušení je možné navrhnout vhodné úpravy pro vylepšení tohoto styčnicku. Jednou z možností jsou přidání výztuhy na zadní straně sloupu (obrázek 26). Výztuhy dostatečně vyztuží stojinu sloupu a zabrání tak její nadměrné deformaci. Současně přenesou značnou část namáhání přímo do pásnic a zmenší tak koncentrované zatížení stojiny sloupu. [49]



Obrázek 26: Výztuhy na zadní straně sloupu, přehled posudků, průběh plastické deformace [60]

Vyztužení stěny sloupu přidavným plechem zvyšuje únosnost stěny sloupu ve smyku, v tahu i v tlaku. Šířka výztuhy se navrhuje taková, aby vyztužila stěnu hned za zaoblením. Tloušťka výztuhy nemá být menší než tloušťka stěny sloupu. Délka výztuhy se navrhuje taková, aby pokryla celou účinnou délku stěny v tahu a v tlaku, případně a vyztužení celého smykového panelu. Na (obrázek 27) jsou znázorněny varianty vyztužení styčnicku a jejich vliv na jeho únosnost. Je vidět, že správná volba vyztužení může únosnost styčnicku zvednout i o 50 %.



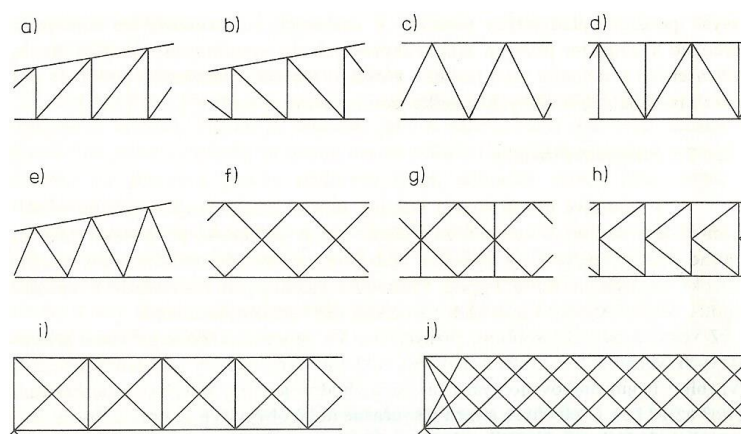
Obrázek 27: Vliv různých variant vyztužení styčnicku na jeho únosnost [56]

2.4 DIAGONÁLNÍ ZTUŽENÍ

Diagonální ztužení neboli zavětrování slouží k tomu, aby konstrukce získala maximální tuhost. Jde o přidavné výztuhy, jež brání vertikálním konstrukčním prvkům ve vychýlení, které může v konečném důsledku vést i ke kolapsu konstrukce. [65] Nevýhodou přidávání výztuh je rostoucí hmotnost konstrukce.

Funkci ztužidel můžeme obecně shrnout do následujících tří bodů:

- Zajištění dostatečné prostorové tuhosti konstrukce a přenosu vodorovných zatížení.
- Zajištění tvaru a polohy konstrukce.
- Zajištění stability tlačných prvků i celé konstrukce. [26]



Obrázek 28: Příklady diagonálního ztužení [53]

U prutových soustav se rozlišuje vnější, vnitřní a celková statická rovnováha.

Vnější statická určitost prutových soustav se vztahuje k určení vnějších neznámých stykových sil uvolněného prutového tělesa z použitelných podmínek statické rovnováhy. Nutnou podmínku vnější statické určitosti můžeme vyjádřit vztahem:

$$s_e = 0 \Rightarrow v_e = \mu_e, \quad (22)$$

kde μ_e je počet neznámých parametru vnějších stykových sil a v_e počet použitelných statických podmínek rovnováhy.

Vnitřní statická určitost se vztahuje k určení sil v prutech. Jestliže napíšeme pro všechna styčnicková tělesa použitelné podmínky statické rovnováhy, pak z těchto podmínek vhodnými algebraickými úpravami obdržíme podmínky statické rovnováhy prutového tělesa. Počet všech použitelných podmínek statické rovnováhy pro prostorovou, resp. rovinnou prutovou soustavu je $3k$, resp. $2k$ a podmínka vnitřní statické určitosti má tvar:

$$\text{Pro prostorovou prutovou soustavu} \quad 3k - 6 = p \quad (23)$$

$$\text{Pro rovinnou prutovou soustavu} \quad 2k - 3 = p \quad (24)$$

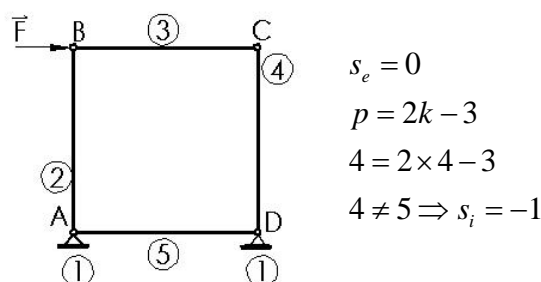
Kde k je počet styčníků, p počet prutů, $3k$ počet použitelných podmínek statické rovnováhy pro prostorovou prutovou soustavu, $2k$ počet použitelných podmínek statické rovnováhy pro rovinnou prutovou soustavu, $3k - 6$ počet použitelných podmínek statické rovnováhy pro určení sil v prutech u prostorové prutové soustavy, $2k - 3$ počet použitelných podmínek statické pro určení sil v prutech u rovinné prutové soustavy.

Je-li $3k - 6 < p$, resp. $2k - 3 < p$, pak prutová soustava obsahuje více prutu a tím i více neznámých prutových sil, než jsme schopni ze statických podmínek určit. stupeň vnitřní statické neurčitosti pak určíme ze vztahu:

$$s_i = p - (3k - 6) \text{ resp. } s_i = p - (2k - 3), \quad (25)$$

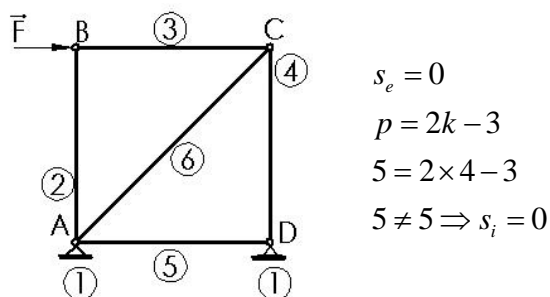
Tvoří-li pruty prutové soustavy trojúhelníkové obrazce, pak je prutová soustava vždy vnitřně staticky určitá. [13]

Důležitost a význam diagonálního ztužení je vidět na jednoduchém příkladu. Prutová soustava je zatěžována silou F o známé velikosti. Styčníky jsou značeny písmeny A-D a pruty jsou očíslovány, přičemž číslo 1 je přiřazeno základnímu tělesu.



Obrázek 29: Soustava 4 prutů.

Na obr. (obrázek 29) jsou čtyři pruty spojené do čtverce. Soustava je zvnějšku staticky určitá, ale vnitřní statická určitost vyjde -1. Soustava je tedy vnitřně staticky neurčitá (má málo prutů).



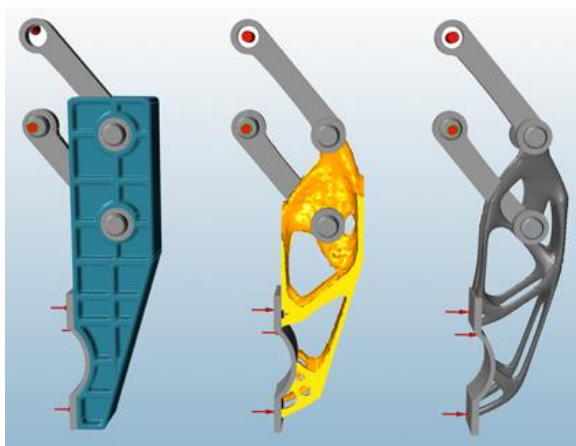
Obrázek 30: Soustava 5 prutů.

Přidáním jednoho prutu (ztužidla) se situace změní obr (obrázek 30). Díky diagonálně vloženému prutu se soustava stala staticky plně určitou.

2.5 OPTIMALIZACE

Optimalizace je proces výběru nejlepší varianty z množství možných jevů. [59]

Od jednotlivých strojních částí se obvykle vyžaduje, aby byly co nejpevnější, nejlehčí a nejlevnější. Kompromis mezi těmito požadavky hledá optimalizace. Není-li sestava topologicky optimalizována, každá její část pravděpodobně váží více, než je nezbytně nutné. To znamená, že se používá zbytečně moc materiálu, zvyšují se náklady na přepravu, zátěž na pohyblivé části je vyšší, než je nutné a energetická účinnost je horší. [51] Optimalizace se snaží najít rovnováhu mezi tvarem, váhou a funkcí dílu. Optimální tvar dílu je často organický a kontraintuitivní, takže jeho design vyžaduje jiný přístup. Nové způsoby výroby, jako je 3D tisk nebo aditivní technologie, nám umožňují vyrábět tvarově velmi složité díly. Použití těchto technologií je v dnešní době drahé, ale i přesto je jich využíváno stále častěji.



Obrázek 31: Příklad optimalizace [35]

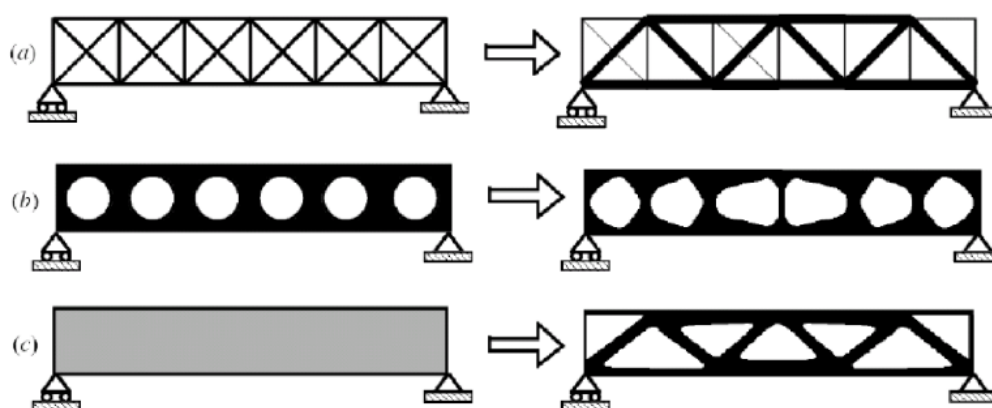
Optimalizaci konstrukcí lze rozdělit na tři základní přístupy, a to na optimalizaci rozměrovou („sizing optimization“), tvarovou („shape optimization“) a topologickou (Topology optimization).

Rozměrová optimalizace obvykle hledá optimální rozměry geometricky jednoduchých těles, jako jsou např. průměry a délky prutů nebo tloušťky plechů. Typicky se jedná o optimalizaci prutových soustav a rámových konstrukcí.

Tvarová optimalizace určuje optimální tvar části hranice tělesa.

Tyto dvě úlohy se zkoumají nejdelší dobu a způsob jejich řešení bývá odlišný od řešení topologické optimalizace.

Topologická optimalizace je nejobecnější úlohou, kde dochází k současnému návrhu tvaru i topologie. Optimalizuje rozložení materiálu v daném prostoru, pro danou skupinu zatížení, dané okrajové podmínky a omezení. Od výše zmíněných druhů optimalizace se liší především tím, že může dosáhnout jakéhokoliv tvaru. Tato úloha může být rozšířena o optimalizaci materiálových parametrů, pak se jedná o tzv. „free material optimization“. [57]



Obrázek 32 : Příklad optimalizace a)rozměrové, b)tvarové, c)topologické

Příkladem užití optimalizace u věžových jeřábů je různá velikost prutů u základny věže a u jejího vrcholu. V případě, že by se toto posunulo ještě dál, teoreticky by každý prut mohl mít svůj jedinečný tvar a konkrétní místo v konstrukci. To by vedlo k lehké, velmi pevné a tuhé konstrukci, přesně spočítané pro daný účel. Ovšem výroba takových konstrukcí by byla v dnešní době velmi drahá a nevhodná.

3 MATERIÁLY

Materiály použité na věžové jeřáby musejí splňovat jisté požadavky. Materiál musí dostatečně pevný a odolný na zatížení tahem, tlakem i krutem. Také je nutné zabránit vzniku křehkého lomu a nejnižší provozní teplota se má pro ČR uvažovat -35°C . Při použití ocele se postupuje dle ČSN EN 1993-1-8. [58] U hliníkových konstrukcí podle ČSN EN 1999-1.

3.1 OCEL

Produkce železa a oceli byla v minulém století považována za měřítko vyspělosti ekonomiky určité země a železo bylo dokonce považováno za symbol 20. století. Československo patřilo k jejím největším světovým výrobcům. V současnosti výroba železa a oceli klesá [46] a stejně tak klesá i jejich význam.

Základem oceli je technické železo. Jde o slitinou čistého železa a celé řady příměsí (legur), které výrazně ovlivňují vlastnosti výrobku a jsou buď obsazeny již v surovinách, z nichž se ocel vyrábí, nebo se při výrobě záměrně přidávají. Největší vliv na vlastnosti železa má uhlík. Podle jeho množství rozlišujeme ocel (kujné železo) a železo (litina, nekujné železo). Hranici tvoří hodnota 2,1% obsahu uhlíku.

U ocelových konstrukcí vyrobených před rokem 1900 se většinou používala tzv. svářková ocel. Jde o druh dnes už méně kvalitní oceli. Obsahovala zbytky strusky, a proto měla rozdílnou odolnost vůči namáhání v závislosti na jeho směru působení. Ve směru vláken (válcování) měla vyšší pevnost než při namáhání v kolmém směru na.

Při návrhu ocelové konstrukce se musí brát ohled i na stárnutí oceli. To je jev, při kterém dochází k nápadnému snížení houževnatosti při normálních teplotě v průběhu delšího času. Mez pružnosti a pevnost se při tom zvyšují.

Na ocelové konstrukce se používá především nerezová ocel. Nerezová ocel je vysoce legovaná s vysokou odolností vůči korozi. Přesnější pojmenování než „nerezová“ je „korozivzdorná“, není totiž vůči korozi imunní, jen vysoce odolná. Obsahuje minimálně 10,5 % chromu, ten reaguje s kyslíkem v atmosféře a vytváří tenkou ochrannou vrstvu oxidů chromu. Tato pasivní vrstva oxidů chrání ocel před korozi. [32] Nerezové oceli jsou nemagnetické, mají dobré mechanické vlastnosti a jsou snadno dostupné. Jejich cena se liší podle konkrétního typu oceli. Jejich nevýhodou je častá náchylnost ke křehnutí za vysokých teplot.



Obrázek 33: Příklad ocelové tyče [48]

3.2 DURAL

Počátky výroby hliníku lze datovat kolem roku 1825, ve kterém Oerstedt získal malé množství hliníku redukcí chloridu hliníku amalgámem draslíku. Průmyslová výroba začíná až rokem 1886, kdy Heroult a Hall objevili možnosti výroby hliníku elektrolýzou.

Dural (z lat., „tvrdý hliník“) je obchodní označení pro různé slitiny obvykle 90–96 % hliníku a 4–6 % mědi s menšími přísadami hořčíku, manganu aj. Oproti čistému hliníku je dural jen nepatrně těžší, ale až pětikrát pevnější v tahu a tvrdší. Pevnost i tvrdost se zvyšuje tepelným opracováním a zušlechťováním, podobně jako u ocelí.

Slitiny typu Al-Cu-Mg (duraly) patří k nejstarším slitinám hliníku. Měď je považována za jeden z nejdůležitějších prvků v hliníkových slitinách, protože jim dodává pevnost. Mangan je legován za účelem zvýšení odolnosti proti korozi a částečně i zvýšení pevnostních vlastností.

Díky nízké hmotnosti a dobrým mechanickým vlastnostem, zejména při nízkých teplotách pod bodem mrazu, je největší procento použitých hliníkových slitin v současnosti při výrobě letadel.

Výhody duralu jsou tedy nízká hmotnost, korozivzdornost, dobrá možnost kombinace s jinými materiály, vynikající deformační schopnosti (pohlcování energie) a dobrá obrobitelnost. [30]

Nevýhodou je, že se špatně sváří či povrchově upravuje (elox). Také je špatně odolný vůči korozi.



Obrázek 34: Příklady hliníkových trubek [42]

3.3 TITAN

Titan patří do skupiny těžkovitelných kovů, které se vyznačují velkou pevností, vysokou teplotou tavení, značnou tvrdostí a odolností proti korozi. Jde o přirozeně se vyskytující kov, který patří svými 0,6 % mezi devět nejrozšířenějších prvků v zemské kůře. Nevyskytuje se však v čisté podobě. V malé míře je obsažen v mnoha minerálech a jeho získávání je stále velmi obtížné. Složitý proces výroby je finančně nákladný, a proto se titan využívá zejména v leteckém a kosmickém průmyslu. Ani výroba titanových slitin není jednoduchá.

Titan má některé unikátní vlastnosti proti jiným kovům, a to:

- nejvyšší poměr mezi pevností a hustotou ze všech kovových materiálů,
- extrémní mechanické vlastnosti a schopnost tepelné zátěže,
- vysoká pevnost v tahu – větší než u oceli při 42% úspory hmotnosti,
- vysoká korozní odolnost,
- vysoká odolnost vůči kyselinám a zásadám,
- vysoká biokompatibilita.

Požívá se zejména jako přísada do speciálních slitin, kde podstatným způsobem ovlivňuje jejich mechanické vlastnosti. [30]



Obrázek 35: Titan [50]

3.4 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

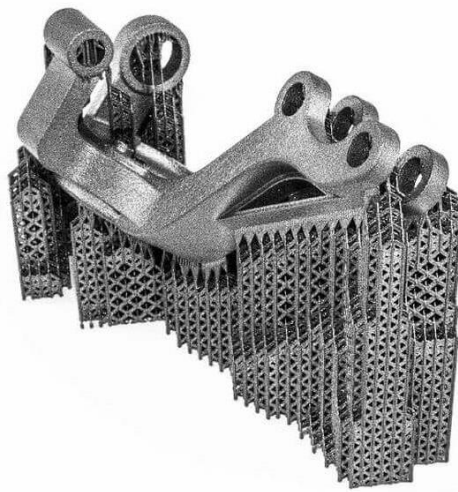
Základy rapid prototyping položil v letech 1980-1981 Japonec Hideo Kodama. Také popsal technologii vytvrzování tekutého roztoku UV světlem, kterou si o pár let později patentoval Chuck Hull pod názvem SLA (StereoLithography). [2]

Aditivní výroba označuje proces, při němž vzniká výrobek postupným nanášením tenkých vrstev na sebe. Ačkoliv je aditivní výroba v podstatě totéž, co 3D tisk, nebo rapid prototyping (zrychlený návrh a výroba prototypu), na rozdíl od těchto pojmů se využívá zejména pro označení procesů, při nichž vzniká koncový výrobek, a nikoliv jen prototyp. [17]

Aditivní technologii využívají především 3D tiskárny. Jde o tvorbu 3D modelu přidáváním materiálu vrstvu po vrstvě. [63] Dnes se tiskne napříč materiály od plastů, přes kovy až po beton. Velkou výhodou je, že složitost dílu v podstatě nemá vliv na dobu výroby. Také množství odpadu je nižší než u jiných druhů výroby, a navíc je většinou recyklovatelný.

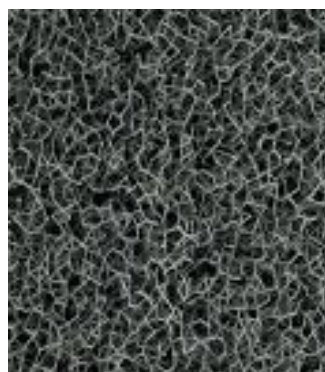
Asi nejrozšířenějším typem 3D tisku je FDM - fusion deposition modeling, kdy výrobek vzniká nanášením natavených vrstev materiálu, nejčastěji pasty. Pro práci s kovem se používá technologie SLS (Selective Laser Sintering), kde jde o „spékání“ velmi jemného prášku

laserem. Výhodou tisku je možnost „vyrobit“ model z jednoho kusu. Tím odpadají spoje, ve kterých často vzniká velké napětí. Naopak velkou a nejvýraznější nevýhodou této technologie je její cena. Kovy, používané při tisku jsou například titan (TiAl_6V_4), hliník ($\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$) nebo nerezová ocel (X2CrNiMo 17-12-2). Na (obrázek 36) je vytištěný model i s podporami, které se musí mechanicky odstranit.



Obrázek 36: Příklad 3D tisku z kovu [1]

Příkladem využití 3D tisku, konkrétně technologie SLS je kovová pěna. 3D tisk kovové pěny je rychlejší a levnější než konvenčním způsobem. Ta spočívá v použití práškového kovu v kombinaci s nadouvadlem, jímž je zpravidla titanhydrid TiH_4 . Z této směsi vznikne meziprodukt ve formě drátu, který se nechá vypěnit za tepla diskontinuálním procesem. Tento proces je zdoluhavý a nákladný, proto je výhodnější použití aditivní technologie. [15]



Obrázek 37: Kovová pěna (miniaturní příhradová konstrukce) o objemu 8 000 cm³ vyvinutá firmou Betatype z titanové slitiny Ti6Al4V . Foto: Betatype [24]

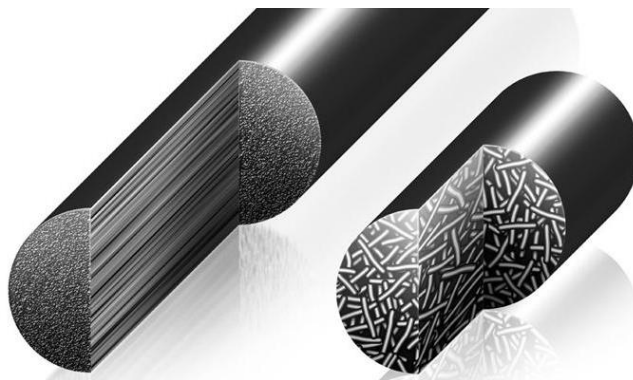
Kovová pěna je lehká a velmi pevná. Mohl by to být jeden ze směrů, kterým by se mohly kovové konstrukce jednou ubírat.

3.5 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Jako kompozity se označují materiály, které jsou složeny ze dvou nebo více složek, které se výrazně liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Spojením těchto složek vznikne zcela nový materiál s unikátními vlastnostmi, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou samostatně, ani prostou sumací.

Významnými typy kompozitů jsou plasty vyztužené různými druhy vláken. Podle délky vláken je lze rozdělit do dvou skupin. Syntetické materiály vyztužené krátkými vlákny tzv. *krátkovláknové* (poměr délka/průměr $L/D < 100$) a syntetické materiály vyztužené dlouhými vlákny tzv. *dlouhovláknové* ($L/D > 100$) tj. vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce).

Krátkovláknové kompozity se používají především pro injektované výlisky nebo pro extrudované plastové výrobky. Dlouhovláknové kompozity se často používají u velkých konstrukcí, jako jsou lodě, tlakové nádoby nebo křídla větrných turbín. Principem vlastního vláknového vyztužení je, že vyztužující vlákna, mající o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s pojivem (polymerní matricí), se při vnějším namáhání deformují méně než polymer. Dochází tak ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákno/polymer, které v případě adheze mezi oběma komponentami umožňují přenos veškerého napětí z nepevné matrice do vláken. Ta jsou schopna nést veškerá napětí působící na kompozitní dílec, takže nepevné, ale deformovatelné pojivo je prakticky bez napětí. [5]



Obrázek 38: Příklad vyztužení dlouhými a krátkými vlákny [27]

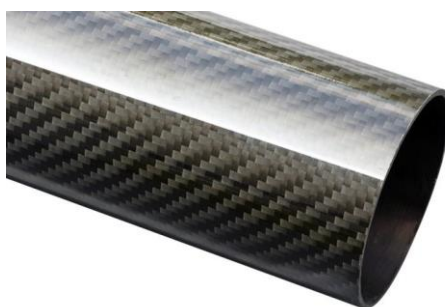
Plasty vyztužené vlákny obsahují konečná nebo nekonečná 3,5 až 24 μm silná vyztužující vlákna ze skla, uhlíku nebo aramidu s matricí z termosetu nebo termoplastu. Jednotlivé složky jsou vybírány individuálně, v závislosti na konečném použití produktu. [11]

Jedním z příkladů složky kompozitu je *uhlíkové vlákno* (také karbonové vlákno – z anglického carbon fibre), jde o druh vlákna obsahujícího uhlík v jeho různých modifikacích. Karbonové vlákno je dlouhý a tenký pramen materiálu o průměru 5–8 μm který se skládá převážně z atomů uhlíku a je využíváno pro výrobu pevných a odolných tkanin.

Atomy uhlíkového vlákna jsou spojeny v krystaly orientované paralelně k dlouhé ose vlákna. Díky takovému uspořádání mikroskopických krystalů vyniká uhlíkové vlákno na svou velmi malou tloušťku vysokou pevností. [54]

Použitím kompozitu místo tradičního materiálu, jako je například ocel, dochází k značnému snížení hmotnosti. To je dáno nízkou hmotností vlastního kompozitu, specifickými vlastnostmi jednotlivých složek a možností vytvořit kompozit přímo pro daný účel. Protože jde o kombinaci materiálů, můžou se kompozity navrhovat s ohledem na specifické vlastnosti, které přinášejí řadu výhod v porovnání s tradičními materiály, např. odolnost proti chemikáliím, elektrické a teplotní izolační vlastnosti atd. [5] Nevýhodou je komplikovanější výroba, vyšší cena a menší odolnost vůči vyšším teplotám.

Kompozitní materiály jsou vhodné především pro zatížení tahem. Při zatížení tlakem, ohybem nebo smykem často nemohou jednotlivé složky kompozitu samy o sobě převzít svůj podíl na přenosu porušujících sil, zejména pokud nemohou zachovat při zatížení své geometrické uspořádání, jako např. vlákna svou vzpřímenost. Proto nejsou pro konstrukce jeřábů vhodné.



Obrázek 39: Trubka z uhlíkových vláken [52]

3.6 POROVNÁNÍ MATERIÁLŮ

Každý z výše uvedených materiálů má svá pro a proti, proč jej použít/nepoužít při stavbě nosné konstrukce jeřábu.

Tabulka 1: Porovnání materiálů

Materiál	Hustota ρ (kg.m ⁻³)	Pevnost v tahu R _m (MPa)	Mez kluzu R _p (MPa)	Cena (Kč/kg)
Nerezová ocel	7 400 – 8 000	630-650	180-220	80 - 150
Titan	4 500	290 - 740	180 - 650	7 000
Dural	2 800	350-400	210-485	120-150

U aditivních technologií a kompozitních materiálů neuvádím hustotu, pevnost v tahu ani mez kluzu, protože jsou tyto hodnoty zcela závislé na konkrétním materiálu nebo výrobku. Totéž platí i u jejich ceny. Například u DMT technologie (kovový 3D tisk) záleží především na rozměrech a na množství spotřebovaného materiálu.

Ocel je dosud nejpoužívanějším materiálem. Z tabulky je vidět, že je relativně levná a má dobré mechanické vlastnosti. Ty se navíc dají vylepšovat pomocí legur.

Čistý titan má výborné mechanické vlastnosti, jako je nízká měrná hustota, ale je velmi těžko dostupný. Proto se používá především ve formě slitin.

Hliník a jeho slitiny, především dural, je sice pevný a lehký, ale špatně se svařuje a má nízkou odolnost proti korozi, což je u konstrukcí stavebních jeřábů velkou nevýhodou.

Díly vyrobené aditivní technologií mohou být optimalizované na přesný tvar a tvarově složité, nicméně 3D tisk z kovů je stále velmi drahý a používá se spíše pro prototypovou výrobu.

Kompozitní materiály se dají vyrobit přesně na požadavky dané konstrukce, ale nejsou cenově příznivé a své dobré vlastnosti mají jenom při zatížení tahem nebo tlakem ve směru vláken. Při jiném zatížení se může stát, že napětí nepřeberou vlákna, ale zůstane na daleko méně pevné matici, což by vedlo k porušení materiálu. Proto jsou pro věžové konstrukce nevhodné.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo zpracovat kritickou rešerši na nosné konstrukce věžových jeřábů a zhodnocení trendů do budoucna. První část práce je zaměřená na seznámení s jeřáby, jejich rozdělení do skupin a jejich stručnou charakteristiku.

Ve druhé části se zabývám konkrétně ocelovými konstrukcemi věžových jeřábů, jejich prvky a optimalizací. Poslední část je zaměřená na materiály, které se ke stavbě nosných konstrukcí používají nebo by se potenciálně používat mohly.

Vývoj jeřábů je potřeba brát z více pohledů. Z pohledu konstrukce jsme se posunuli od plných nosníků, které se stále využívají, k příhradovým konstrukcím. Ty jsou lehčí a snesou větší zatížení. Díky použití optimalizace se dá jejich hmotnost stále zmenšovat, a naopak únosnost zvětšovat. Na to navazují i materiály. Od původně používaného dřeva jsme se dostali k oceli a hliníku, respektive k jeho slitinám. To má opět velký vliv na hmotnost a nosnost jeřábů.

Opustit klasické ocelové konstrukce nebude jednoduché, už jen pro jejich cenu, historický význam a prostý zvyk na ně. Předpokládám však, že do budoucna se pro konstrukce jeřábů bude více využívat lehkých kovů jako je titan a jeho slitiny. Ten je sice zatím cenově náročný, protože se těžko získává, ale to se může rychle změnit. Ostatně podobný problém byl dříve i s hliníkem.

Velký potenciál vidím ve využití aditivních technologií. Díky odlišnému způsobu výroby jednotlivých dílů máme možnost vyrábět tvarově velmi složité komponenty. Proto se tu dá plně využít optimalizace, kdy bychom mohli od přímých, případně zakřivených prutů dojít k tvarově nestandardním prutům, které by byly navrženy čistě účelově bez „materiálu navíc“. Tím by se celá konstrukce opět odlehčila. Budoucnost mají i kovové pěny, pokud se jejich výroba zlevní. To platí i pro aditivní technologie, ale protože se v poslední době používají čím dál více, a nejen na tvorbu prototypů, dá se klesání jejich ceny předpokládat.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] 3D tisk kovu. In: *FutLab.cc* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://futlab.cc/3d-tisk-kovu/>
- [2] 3D tisk: jak funguje a kde začít? *Svět hardware* [online]. 16.1.2019 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-a-kde-zacit/48403>
- [3] A) *Sizing*, b) *shape* and c) *topological optimization* [online]. In: . [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/a-Sizing-b-shape-and-c-topological-optimization-3_fig1_281454400
- [4] CMÍRAL, Vladimír. Ocelové konstrukce: Informace k zákl. studiu o rozsáhlém učeb. oboru : Učeb. text pro 2. a 3. roč. technologie ocelových konstrukcí pro odb. učiliště a učňovské školy. Praha: SNTL, 1965. Kurs techn. znalostí.
- [5] Co jsou to kompozitní materiály. *GDP KORAL COMPOSITES* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/co-jsou-kompozitni-materialy/w6>
- [6] Crane (machine). In: *New World Encyclopedia* [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: [http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Crane_\(machine\)](http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Crane_(machine))
- [7] Crane Plans Floor Mounted Jib. In: *Cell Code* [online]. [cit. 2019-03-29]. Dostupné z: <https://cellcode.us/quotes/crane-plans-floor-mounted-jib.html>
- [8] Cranes. In: *Safe work australia* [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.safeworkaustralia.gov.au/cranes>
- [9] *Derrick Crane* [online]. In: . [cit. 2019-03-29]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/derrick-crane-11062990733.html>
- [10] DRAŽAN, František a Ladislav KUPKA. *Jeřáby: určeno [také] posl. stroj. fakult a stud. prům. škol*. Praha: SNTL, 1968 [cit. 2019-03-01]. Technický průvodce.
- [11] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [12] EN 1993-1-8, 2005. Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí, Část 1-8: Navrhování styčníků, ČNI, Praha.
- [13] FLORIAN, Zdeněk, Emanuel ONDRÁČEK a Karel PŘIKRYL. *Mechanika těles: statika*. Vyd. 7., V Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-3440-0.
- [14] Greco-Roman Trispastos ("Three-pulley-crane"), the simplest crane type (150 kg load). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Crane_\(machine\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Crane_(machine))

- [15] HAJNYŠ, Jiří. 3D tisk kovů: V čem spočívají výhody odlehčených kovových konstrukcí? [online]. In: . [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/3d-tisk-kovu-k-cemu-slouzi-odlehcene-kovove-konstrukce/>
- [16] Historie jeřábů a zdvihacích zařízení. In: *Jan Hlavatý: školení a revize* [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <https://www.skolenirevize.cz/historie-jerabu.php>
- [17] HOMOLA, Jan. Aditivní výroba. *3D-tisk.cz* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/aditivni-vyroba/>
- [18] [Http://www.slovník-cizích-slov.cz/optimalizace.html](http://www.slovník-cizích-slov.cz/optimalizace.html) [online]. [cit. 2019-02-22].
- [19] Jaroslav Kadlčák, Jiří Kytýr, Statika stavebních konstrukcí I., VUTIUM, Brno 1998, str. 159,160.
- [20] Jaune pont roulant portique, vue de face, isolé sur fond blanc. In: *123Rf* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://fr.123rf.com/photo_35758070_jaune-pont-roulant-portique-vue-de-face-isol%C3%A9-sur-fond-blanc.html
- [21] JURÁŠEK, Oldřich. *Teorie nosných konstrukcí: Určeno pro posl. fak. strojní*. Praha: MON, 1989. Učební texty vys. škol.
- [22] KEMKA, Vladislav. *Stavba a provoz strojů: stroje a zařízení pro SPŠ strojní*. Praha: Informatorium, 2009 [cit. 2019-03-01]. ISBN 978-80-7333-075-0.
- [23] *Kloubový spoj úhelníky z kategorie styčníků nosníků ke sloupům*. In: *CADNET Power by Graitec* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: http://www.cadnet.cz/detail-faq.html?faq_id=118
- [24] Kovová pěna (miniaturní příhradová konstrukce) o objemu 8 000 cm³ vyvinutá firmou Betatype z titanové slitiny Ti6Al4V. Foto: Betatype. In: *Konstrukter.cz* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/3d-tisk-kovu-k-cemu-slouzi-odlehcene-kovove-konstrukce/>
- [25] KOŽEVNIKOV, Sergej a kolektiv. *Ocelové konstrukce: Příručka . pro konstruktéry*. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1950. Knižnice kovoprůmyslu. Ř. A.
- [26] KUKLÍK, Petr a Aleš TAJBR. Význam ztužení při návrhu a realizaci vazníkových konstrukcí. *TZB-info* [online]. 25. 6. 2012 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/8748-vyznam-ztuzeni-pri-navrhu-a-realizaci-vaznikovych-konstrukci>
- [27] Long-Short Carbon-Fiber-Reinforcement Comparison. In: *Ipitaka* [online]. 17. 12. 2016 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.ipitaka.com/blogs/news/what-s-composite-material>
- [28] MACÁK, Marek. *Analýza mriežkovej škrupiny kruhového pôdorysu*. Bratislava, 2010. Diplomová práce. Slovenská technická univerzita v Bratislave fakulta stavebná. Vedoucí práce Norbert Jendželovský.

- [29] MELCHER, Jindřich, KARMAZÍNOVÁ, Marcela, BAJER, Miroslav, SÝKORA, Karel, Prvky kovových konstrukcí, Pruty namáhané kroucením [online], VUT v Brně, Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BO02-Prvky%20kovovych%20konstrukci/M05-Pruty%20namahane%20kroucenim.pdf>
- [30] MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. Děčín: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014 [cit. 2019-05-09]. ISBN 978-80-260-7132-7.
- [31] MOTYČKA, Vít a Jaromír ČERNÝ. *Věžové jeřáby v pozemním stavitelství*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-505-1.
- [32] Největší mýty o nerezové oceli. In: *E-konstrukter: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. 16. 01. 2015 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/nejvetsi-myty-o-nerezove-oceli>
- [33] NOVÁK, Otakar a Jiří HOŘEJŠÍ. Statika stavebních konstrukcí: určeno [také] posluchačům vysokých a průmyslových škol stavebních. Praha: SNTL, 1972. Technický průvodce. (str.691)
- [34] NOVÁK, Otakar a Jiří HOŘEJŠÍ. Statika stavebních konstrukcí: určeno [také] posluchačům vysokých a průmyslových škol stavebních. Praha: SNTL, 1972. Technický průvodce.
- [35] Optimalizace/DOE - Inspire. In: *Advanced engineering*. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.advanced-eng.cz/optimalizace-doe#!prettyPhoto>
- [36] PECHAR, Jiří a Jiří STUDNIČKA. *Prvky ocelových konstrukcí*. Praha: ČVUT, 1991 [cit. 2019-05-01]. ISBN 80-01-00702-2.
- [37] Prut (mechanika). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Prut_\(mechanika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Prut_(mechanika))
- [38] PŘÍHODA, Martin. Určení prostorových vztahů jeřábové dráhy. Brno, 2013. 119 s., 24 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Alexej Vitula.
- [39] Příklady styčníků s různým zatříděním dle tuhosti. In: *Konstrukce: odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vliv-ohybove-tuhosti-stycniku-na-navrh-prvku-ocelove-konstrukce/>
- [40] *Přípoj deskou na stojině nosníku z kategorie styčníků dvou nosníků*. In: *CADNET Power by Graitec* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: http://www.cadnet.cz/detail-faq.html?faq_id=118
- [41] Původní návrh přípoje, přehled posudků, průběh plastické deformace. In: *TZB-info* [online]. 9. 11. 2015 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/13419-nekolik-prikladu-nevhodneho-navrhu-stycniku-ocelovych-konstrukci-a-mozna-reseni>

- [42] *Rovná hliníková trubka 63 mm x 450 mm* [online]. In: . [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.escape6.cz/rovna-hlinikova-trubka-63-mm-x-450-mm-ruzne-povrchove-upravy-id353383/>
- [43] *Seilwinde-laufwagen-prinzip-english*. In: *Wyssen seilbahnen* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.wyssenseilbahnen.com/en/wyssen-cable-crane/seilwinde-laufwagen-prinzip-english/>
- [44] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. BUDYNAS a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí* [online]. V Brně: VUTUM, 2010 [cit. 2019-05-05]. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [45] Spierings KRANEN SK488-AT4, Tower Cranes / Conventional-Lattice Boom Cranes / Gantry Cranes / Port Cranes / Misc. Cranes, Construction Equipment. In: *Quality Cranes & Equipment, LLC* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://inventory.qualitycranes.com/qualitycranes/construction-equipment/tower-cranes-conventional-lattice-boom-cranes-gantry-cranes-port-cranes-misc-cranes/spierings-kranen-sk488-at4/d9c7f047-688f-4623-af67-c18b19b849b5.html>
- [46] STUDNIČKA, Jiří. *Ocelové konstrukce*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03473-9.
- [47] *Styčnickový plech tří diagonál z kategorie styčníků ztužidel*. In: *CADNET Power by Graitec* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: http://www.cadnet.cz/detail-faq.html?faq_id=118
- [48] Světová poptávka po oceli dál poroste. Rychleji, než se čekalo. In: *Týden.cz* [online]. 16. 10. 2018 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: https://www.tyden.cz/rubriky/byznys/svet/svetova-poptavka-po-oceli-dal-poroste-rychleji-nez-se-cekalo_499756.html
- [49] ŠABATKA, Lubomír, Drahošlav KOLAJA a Martin ROLNÝ. Několik příkladů nevhodného návrhu styčníků ocelových konstrukcí a možná řešení. In: *TZB-info* [online]. 9. 11. 2015 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/13419-nekolik-prikladu-nevhodneho-navrhu-stychniku-ocelovych-konstrukci-a-mozna-reseni>
- [50] Titan. In: *Prvky* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/22.html>
- [51] Topology Optimization. ANSYS [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/structures/topology-optimization>
- [52] Trubka z uhlíkových vláken. In: *Tasuns* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://cz.t-composites.net/custom-carbon-fiber-tubes/carbon-fiber-tubes/carbon-fiber-tube.html>
- [53] Typy uspořádání mezipásových prutů příhradových vazníků. In: *Daily ocelových konstrukcí* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://detailyok.webnode.cz/halovy-objekt/stresni-konstrukce/vazniky/>

- [54] Uhlíkové vlákno. *KORDCARBON* [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno
- [55] Underslung EOT Crane. In: *R S Engineering Works #EOT CRANE SUPPLIE* [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://www.rsengineerings.com/products/underslung-eot-crane/6>
- [56] Vliv různých variant vyztužení styčníku na jeho únosnost. In: *TZB-info* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/13273-modely-styčníku-ocelovych-konstrukci>
- [57] VOTRUBEC, Vlastimil a Jan KOLÁŘ. *Optimalizace strojních dílů a celků*. Liberec: VÚTS, 2015. ISBN 978-80-87184-60-8.
- [58] VRANÝ, Tomáš a Jakub DOLEJŠ. *Ocelové konstrukce: textové materiály*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04128-4.
- [59] Význam slova optimalizace. In: *Slovník cizích slov* [online]. [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <http://www.slovník-cizich-slov.cz/optimalizace.html>
- [60] Výztuhy na zadní straně sloupu, přehled posudků, průběh plastické deformace. In: *TZB-info* [online]. 9. 11. 2015 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/13419-nekolik-prikladu-nevhodneho-navrhu-styčníku-ocelovych-konstrukci-a-mozna-reseni>
- [61] WALD, František a Zdeněk SOKOL. *Navrhování styčníků*. Praha: České vysoké učení technické, 1999. ISBN 80-01-02073-8.
- [62] *What is a tower crane in German* [online]. In: . [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://german.stackexchange.com/questions/33654/what-is-a-tower-crane-in-german>
- [63] What is Additive Manufacturing? *Additive manufacturing* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://additivemanufacturing.com/basics/>
- [64] *Základy navrhování ocelových konstrukcí*. Praha, 1976.
- [65] Zavětrování dřevěné konstrukce. *Venkovský dům- projekty a stavební knihy* [online]. [cit. 2018-08-04]. Dostupné z: <http://www.venkovskydum.cz/zavetrovani-drevostavby/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A_s	[m]	Výpočtový průměr šroubu
B	[Nm]	Bimoment
B_{Sd}	[Nm]	Návrhový bimoment
d	[m]	Šířka prutu
dt	[-]	Průmět otláčované plochy
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
h	[m]	Výška prutu
I_ω	[Nm]	Moment tuhosti v prostém kroucení
I_ω	[Nm]	Výsečový moment setrvačnosti průřezu ke středu smyku
K_b	[-]	Střední hodnota l_b/L_b pro všechny nosníky nad uvažovaným podložím
K_c	[-]	Střední hodnota l_c/L_c pro všechny sloupy v uvažovaném podloží,
l	[m]	Délka prutu
L	[mm]	Délka prutu
l_b	[Nm]	Moment setrvačnosti nosníku
L_b	[mm]	Rozpětí nosníku (mezi středy sloupů)
l_c	[Nm]	Moment setrvačnosti sloupu
L_c	[m]	Výška podlaží (sloupu)
m	[MPa]	Kroutící zatížení prutu
M_{Sd}	[Nm]	Návrhový ohybový moment
p	[-]	Počet prutů
Rm	[MPa]	Pevnost v tahu spojovací součásti
R_{mP}	[MPa]	Pevnost v tahu spojované součásti
R_p	[MPa]	Mez kluzu
s_e	[-]	Podmínka vnější statické určitosti
s_i	[-]	Stupen vnitřní statické neurčitosti
S_ω	[Nm]	Výsečový statický moment pro posuzovací místo
T	[Nm]	Celkový kroutící moment
t	[mm]	Tloušťka průřezu v posuzovaném místě
T_{Sd}	[Nm]	Vnější kroutící moment v posuzovaném průřezu
T_t	[Nm]	Moment prostorového kroucení
$T_{\tau,Sd}$	[Nm]	Návrhový moment prostorového kroucení
T_ω	[Nm]	Moment vázaného kroucení ke středu ohybu

$T_{\omega, Sd}$	[Nm]	Návrhový moment ohybového kroucení
V_{Sd}	[N]	Posouvající síla v posuzovaném průřezu
α	[-]	Součinitel podmínek uložení
β	[-]	Součinitel podmínek zatížení
γ_{M2}	[-]	Součinitel spolehlivosti materiálu
κ	[-]	Součinitel vlivu tuhosti prutu v prostém a ohybovém kroucení
μ_e	[-]	Počet neznámých parametru vnějších stykových sil
ν_e	[-]	Počet použitelných statických podmínek rovnováhy
ρ	[kg·m ⁻³]	Měrná hustota
σ_{ω}	[MPa]	Normální napětí
τ_t	[MPa]	Smykové napětí
τ_{ω}	[MPa]	Výslednice smykového napětí
φ	[°]	Úhel pootočení průřezu
χ	[-]	Opravný součinitel
Ω	[mm ²]	Dvojnásobná plocha omezená střednicí průřezu
ω	[mm ²]	Výsečová plocha